汉语发展性阅读障碍儿童的形音整合能力：字形和字音的相互影响

刘梦连[1,2,3]，杨滢晖[1,2,4]，赵一帆[1,2]，毕鸿燕*[1,2]

（1.中国科学院行为科学重点实验室；中国科学院心理研究所脑科学与学习困难研究中心，北京，100101　2. 中国科学院大学心理学系，北京，100049　3.河北中医药大学人文管理系，石家庄，050200　4.上海建桥学院健康管理学院，上海，201306）

摘　要：

[目的]探查汉语发展性阅读障碍者在形音整合过程中，字形和字音的相互影响是否存在异常。**[方法和结果]**实验 1 以 30 名汉语发展性阅读障碍儿童，29 名同年龄对照组儿童为被试，使用视听跨通道的字形判断任务，结果发现一致语音对字形加工表现出显著的促进作用，语音对字形加工的影响不存在显著的组间差异。实验 2 以 32 名汉语发展性阅读障碍儿童，32 名同年龄对照组儿童为被试，使用视听跨通道的语音判断任务，结果发现一致字形对语音加工表现出显著的促进作用，不一致字形对语音加工表现出显著的抑制作用。同年龄对照组字形对语音加工的影响显著大于发展性阅读障碍组。**[结论]**以上的结果说明在形音整合过程中，汉语发展性阅读障碍儿童在形-音整合中字形对语音加工的影响上存在异常，但语音对字形加工的影响不存在异常。

关键词：发展性阅读障碍　视听整合　字形　字音

Orthography-phonology integration of Chinese children with developmental dyslexia: the mutual influence of orthography and phonology

LIU Menglian[1,2,3], YANG Yinghui[1,2,4], ZHAO Yifan[1,2], BI Hongyan[1,2]

(1.CAS Key Laboratory of Behavioral Science; Center for Brain Science and Learning Difficulties, Beijing 100101, China　2.Department of Psychology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China　3.Department of Humanities and Management, Hebei University of Chinese Medicine, Shijiazhuang 050200, China　4. College of Health Management, Shanghai Jian Qiao University, Shanghai 201306, China)

[Abstract] Previous studies have revealed that individuals with developmental dyslexia (DD) experienced an orthography-phonology integration deficit. Using functional magnetic resonance imaging, researchers have observed hypoactivation in the superior temporal area when individuals with DD performed an orthography-phonology integration task. Additionally, individuals with DD exhibited a delayed and reduced mismatch negative wave in an audiovisual oddball paradigm when using event-related potentials. However, some studies have found no significant differences between normal readers and DD readers when making decisions about a phoneme preceded by a grapheme. These controversial results may be attributed to the varying manifestations of the mutual influence between orthography and phonology during orthography-phonology integration in DD. Nevertheless, there is a lack of comprehensive research on this topic. The present study aims to explore the mutual influences between orthography and phonology during orthography-phonology integration in Chinese children with DD.

Two experiments were designed to separately investigate the mutual influence between

本文系国家自然科学基金面上项目 (32371119) 和国家语委“十四五”科研规划 2023 年度重点项目 (ZDI145-83) 的研究成果之一。

orthography and phonology during orthography-phonology integration in individuals with DD. In Experiment 1, we explored the influence of phonology on orthographic processing. 30 children with DD and 29 age-matched (CA) children participated in Experiment 1. Participants were asked to decide whether a grapheme was real or one invented for the purposes of this study. Each grapheme was accompanied by the presentation of a phoneme, which was either congruent or incongruent with the grapheme. This experiment also included a baseline condition in which only a grapheme was presented. In Experiment 2, we examined the influence of orthography on phonological processing. 32 children with DD and 32 CA children participated in Experiment 2. Participants were asked to decide whether a phoneme was real or invented. Each phoneme was presented with either a congruent or incongruent grapheme. This experiment also included a baseline condition in which only a phoneme was presented.

The results of Experiment 1 revealed a facilitating effect in the congruent condition compared to the grapheme only condition, but no inhibitory effect was observed in the incongruent condition. Furthermore, no significant group difference was found in the influence of phonology on orthography after controlling for the effect of the only grapheme condition. These findings indicate that Chinese children with DD do not exhibit a deficit in the influence of phonology on orthography during orthography-phonology integration. In Experiment 2, a facilitating effect was observed in the congruent condition and an inhibitory effect was observed in the incongruent condition compared to the only phoneme condition. These effects were significantly lower in children with DD than in CA children. These results indicate that Chinese children with DD exhibit a deficit in the influence of orthography on phonology after controlling for the effect of the only phoneme condition. The collective findings from Experiment 1 and Experiment 2 suggest that Chinese children with DD only exhibit a deficit in the influence of orthography on phonology when integrating a phoneme and a grapheme, while the influence of phonology on orthographical processing remains intact.

In conclusion, the present research provides insights into the mechanism of dyslexics' deficit in orthography-phonology integration. Notably, this study revealed that this deficit primarily manifests in the influence of orthography on phonological processing. These findings suggest that the orthography-phonology integration deficit in Chinese children with DD may be attributed to an impaired effect of graphemes on phonological processing.

[Key words] developmental dyslexia, audiovisual integration, orthography, phonology

1 引言

阅读是人们获取外界信息的重要途径。但有一类特殊人群并不能获得良好的阅读能力，即发展性阅读障碍(Developmental Dyslexia, DD)，它指智力正常并接受正常教育，无器质性损伤，但在阅读上存在显著困难的个体(Lyon et al., 2003)。阅读需要视觉和听觉分别对字形和语音加工，并将两个通道的信息整合起来，形成统一的视听表征(Beech, 2002; Law et al., 2018; Macoir et al., 2012)。有研究发现 DD 存在视听整合缺陷(Blau et al., 2009; 2010)。视听整合是指呈现的视觉和听觉信号在时间、空间上大致接近时，视觉和听觉系统倾向于将视听刺激形成统一表征的加工过程(Koelewijn et al., 2010)。DD 视听整合缺陷在阅读上表现为对字形和语音整合的困难。Blomert(2011)提出的形-音自动整合假说认为，DD 的起因是个体不能将字形和字音自动地进行整合。

目前，支持DD存在形-音整合缺陷的研究多集中在神经层面。Blau等人(2009; 2010)使用功能性磁共振成像技术(functional magnetic resonance imaging, fMRI)对 DD 的形-音整合能力进行探讨。他们以字母和语音为实验材料，设置了形音一

致条件，形音不一致条件和单感觉通道条件（视觉和听觉）。结果发现，在排除了单通道的影响后，DD 在形音一致条件下双侧颞上皮层的激活显著小于同年龄对照组(chronological age-matched, CA)，但在不一致条件下的脑区激活则不存在组间差异，即 DD 存在形-音整合缺陷。之后，学者将研究进一步扩展到词汇层面。Kast 等人(2011)以成人 DD 和 CA 为被试，以真词和假词及对应的语音为材料，设置了形音一致条件和单通道条件(视觉和听觉)，要求被试对看和听到的词进行真假词判断。结果表明，在形音一致条件下，DD 左侧缘上回、右侧颞上沟的激活显著弱于 CA 组；在单通道条件下，两组被试脑激活不存在显著差异。这说明 DD 在词汇层面表现出形-音整合缺陷，且不受单通道加工能力的影响。Kronschnabel 等人(2014)则在青少年 DD 中发现了类似的结果。来自汉语的研究使用与 Kast 等人(2011)类似的范式也发现 DD 儿童在形-音整合任务下，颞上区域的激活表现异常(Yang et al., 2020)。从以上的研究结果可以看出，DD 存在形-音整合缺陷，这种缺陷与颞上脑区的激活异常有关，且具有跨语言的一致性。

研究者采用事件相关电位(Event related potential, ERP)技术探讨了 DD 形-音整合能力的时间进程。Froyen 等人(2011)设置了视听跨通道条件和听觉单通道条件，在视听跨通道条件下，以一致的形音刺激作为标准刺激，不一致的形音刺激作为偏差刺激。在听觉单通道的条件下，以字母“a”的发音为标准刺激，字母“o”的发音为偏差刺激。要求被试被动地看和听呈现的刺激。研究者比较了听觉单通道和视听跨通道条件下偏差刺激所诱发的失匹配负波(Mismatch Negativity, MMN)。结果发现，跨通道条件下，CA 儿童的 MMN 波幅比听觉单通道条件显著增强，DD 组则未发现这种变化，但表现出晚期辨别负波的增强(Late Discrimination Negative, LDN)。研究者认为，早期的 MMN 和晚期的 LDN 都可以反应被试的形-音整合能力。DD 只表现出晚期 LDN 波幅的增强说明其形-音整合的时间进程更慢，自动化程度较差。之后，有研究额外增加了图形和语音刺激对作为偏差刺激(Mittag et al., 2013)，以成人 DD 和 CA 组为被试，结果与 Froyen 等人(2011)一致，即无论是不一致的形音刺激还是图形和语音刺激，DD 的 MMN 波幅增强都弱于 CA 组，MMN 的潜伏期更长；同时，还发现 CA 组被试只在偏差刺激为不一致的形音刺激时，表现出显著的 MMN 波幅增强，而对图形和语音对则没有 MMN 波幅的增强；然而 DD 组无论是在两种偏差刺激下的 MMN 波幅都不存在差异，表明 DD 存在形-音整合的缺陷。

但是，也有研究发现不一致的结果。Nash 等人(2016)以 DD 儿童、CA 组和同阅读水平对照组(Reading-level matched， RL 组)为被试，使用字形启动任务，这项任务首先呈现字母或图形，500 毫秒后呈现语音，要求被试判断呈现的语音是否是真实存在的字母。结果发现，DD 儿童的反应时显著大于 CA 和 RL 组的反应时；但在形音一致条件下，DD 组的反应时与两个控制组不存显著差异。之后，Clayton 和 Hulme(2018)为了探查 DD 在形音不一致条件下语音判断的抗干扰能力是否存在异常，在 Nash 等人(2016)研究的基础上，进一步设置了形音不一致条件。结果发现，DD 儿童在所有条件下的反应时显著地长于 CA 组，但与 RL 组的反应时不存在显著差异。并且该研究发现 DD 组在一致条件的促进作用和不一致条件的抑制作用与 CA 和 RL 组不存在差异。这说明 DD 儿童的形-音整合能力在形音一致条件的促进作用和形音不一致条件的抑制作用均与正常读者相同。以上研究说明 DD 儿童不存在形-音整合缺陷。这与已有研究结果不一致(Blau et al., 2009; 2010; Froyen et al., 2011; Kast et al., 2011; Kronschnabel et al., 2014; Mittag et al., 2013; Yang et al., 2020)。

已有研究结果不一致的原因可能有两种。第一，可能与 DD 在形-音整合过程中字形和字音的相互影响的表现不同有关。已有研究多使用神经影像的技术，采用被动任务，或要求被试仅对形音一致的刺激对进行判断，这些研究所使用的范式都无法直接说明 DD 字形和语音相互影响是否存在异常。仅有一篇 fMRI 研究以汉语 DD 儿童及 CA 儿童为被试，使用视听跨通道呈现的字形判断任务，设置了形音一致，形音不一致和视觉单通道条件，要求被试对呈现的汉字进行真假字判断(Yang et al., 2020)。该研究在神经层面发现 DD 在涉及形-音整合的脑区激活异常，但并未在行为层面发现 DD 与 CA 的组间差异。这在一定程度上说明 DD 字音对字形加工的影响存在异常。然而，这一结论需要行为层面的研究进一步论证。Nash 等人(2016)和 Clayton 与 Hulme(2018)研究使用的语音合法性判断任务，行为层面的结果发现 DD 字形对语音加工的影响与 CA 组不存在差异。以上研究结果存在争议的原因可能是探查了 DD 形-音整合的过程中的不同方面，即字形和语音之间的相互影响。DD 可能在形-音整合过程中，表现出语音对字形加工的影响存在异常，但字形对语音加工的影响不存在异常。

第二，DD 在形-音整合过程中，字形和语音的相互影响可能均存在异常，但不同研究的形音刺激对呈现的时间间隔不同导致出现矛盾的结果。在 DD 字形对语音加工影响的研究中，字形早于语音 500 毫秒呈现(Clayton & Hulme., 2018; Nash et al., 2016)，但语音对字形加工影响的研究则是形音刺激同时呈现(Yang et al., 2020)。有研究表明 DD 具有更大的视听时间整合窗口，即当视听刺激的时间间隔较大时，DD 的整合能力比正常儿童更好(Francisco et al., 2017; Hairston et al., 2005)。已有研究发现 DD 字形对语音加工的影响与 CA 组不存在差异(Clayton & Hulme, 2018; Nash et al., 2016)，可能是形音刺激的时间间隔变大提高了 DD 的形音整合能力，进而抵消了其字形对语音加工影响的异常。那么，DD 在形-音整合过程中，字形和语音的相互影响是否都存在异常，抑或是仅语音对字形加工的影响存在异常，这需要今后的研究进一步控制了形音刺激的时间间隔后，探查 DD 在形-音整合过程中，字形和字音相互影响的表现。

基于以上论述，本研究以 DD 儿童及其对应的同年龄正常儿童对照组（CA 组）为被试，在形音刺激对同时呈现的条件下，设计 2 个实验分别在行为层面探查 DD 在形-音整合过程，字形和语音的相互影响是否存在异常。实验 1 探查 DD 儿童语音对字形加工的影响是否存在异常；实验 2 探查 DD 儿童字形对语音加工的影响是否存在异常。在行为层面对 DD 的字形和字音相互影响进行探讨，将有利于进一步加深人们对 DD 形-音整合缺陷认知机制的认识，即 DD 的形-音整合缺陷可能源于其整合过程中字形和语音相互影响的异常。同时，本研究也进一步拓展了 Blomert(2011)提出的形-音自动整合假说。该假说仅从形-音整合的角度解释了 DD 产生的原因，本研究则基于该假说，进一步从字形和语音相互影响的角度入手，对 DD 的可能原因进行探讨。

2 实验 1：语音对发展性阅读障碍儿童字形判断的影响

2.1 *方法*

(1) 被试

实验 1 使用 G*power 3.1 软件(Faul et al., 2007)，计算研究所需的样本量，将效应量设置为 0.25，α 设置为 0.05。计算结果表明，为了达到 0.95 的统计检验力，实验 1 至少共需要 54 名被试。有研究者指出一至二年级 DD 儿童的诊断存在一定的不确定性（施威莰, 2019）。因此，实验 1 包括 59 名三至六年级的儿童，

其中 DD 儿童 30 名（男 25 名，女 5 名），同年龄正常对照组（CA 组）儿童 29 名（男 18 名，女 8 名）。卡方检验的结果显示两组儿童在各个年级人数的分布不存在显著的差异($\chi^2 = 0.47, p = 0.93$)。所有儿童均为右利手，智力正常，不存在器质性损伤，视力或矫正视力正常。DD 儿童的入组标准是：《瑞文联合推理测验》（李丹等, 1988）的标准分大于 85 分，《识字量测验》（王孝玲, 陶保平, 1996）成绩至少低于同年级儿童平均值的 1.5 个标准差。本研究已通过相关单位的伦理审核，所有参与实验的儿童的监护人均签署了“知情同意书”。

两组被试测验成绩的描述性统计结果见表 1。

表 1 实验 1 两组儿童的测验成绩[*M*(*SD*)]

测试项目	DD(n=30)	CA(n=29)	t	Cohen’s d
年龄（年）	10.21(1.03)	10.35(0.99)	－0.56	/
智商	115.13(12.06)	115.66(7.78)	－0.20	/
识字量（个）	1860(567)	2523(479)	-4.84^{***}	－1.26

注：*** 代表 $p<0.001$，括号内为标准差。

(2) 实验材料

视觉刺激材料包括 30 个真字和 45 个假字。考虑到要保证儿童被试对实验材料具有一定的熟悉性，研究使用的真字均选自小学三至五年级语文课本。假字是在真字基础上，打乱部件顺序重新组合成符合正字法规则，但实际并非真实存在的汉字刺激（例如：扌同）。所有真字和假字均为左右结构，字体为“黑体”，大小为 3cm×3cm。真假字在笔画数、部件频率上匹配。在实验过程中，每个真字在三种条件（形音一致、形音不一致和视觉单通道）下各呈现 1 次，每个条件 30 个试次，共 90 个试次；每个假字在跨通道条件（假字和字音一同呈现，例如：扌者-jiǎ）和视觉单通道条件下各呈现 1 次，共 90 个试次。正式实验共 180 个试次，包括真字和假字各 90 试次。听觉刺激材料为 105 个真实存在的字音，包括 30 个与视觉刺激材料里的真字发音一致的字音、30 个与视觉刺激材料里的真字发音不一致的字音和 45 个与假字同时呈现的字音。听觉刺激由一位普通话标准的女性主试使用 DELL 笔记本电脑自带的录音软件录制，并用 Gold Wave 软件处理语音文件，听觉刺激的采样率为 44100 Hz，采样为 16 位。

(3) 实验设计

实验 1 为 3（形音对应关系：形音一致、形音不一致、视觉单通道）×2（组别：DD、CA）的混合实验设计。其中，形音对应关系为组内因素，包括字形与语音一致（以下简称“形音一致”）、字形与语音不一致（以下简称“形音不一致”）以及只呈现视觉字形，不呈现字音（以下简称“视觉单通道”）三个水平。组别为组间因素，包括 CA 组和 DD 组。

(4) 实验程序

实验程序由 E-prime 2.0 软件编制和运行。刺激呈现在 14 英寸 DELL 便携式笔记本电脑的显示器上，分辨率为 1024×768 像素，屏幕刷新频率为 62.5 Hz。实验采用真假字判断任务。屏幕中央首先呈现 500 毫秒的黑色“+”注视点，之后随机呈现真字或者假字，持续 1200 毫秒。真字或假字消失后呈现 800 毫秒空屏，然后进入下一个试次。真字出现时，耳机中会出现一个与真字一致或不一致的字音，或者不呈现字音；假字出现时，耳机中会出现字音或者没有字音。被试需要判断屏幕中央出现的视觉刺激是否为真实存在的汉字，“是”按“T”键，“否”按“Y”键。从视觉刺激呈现到空屏结束（共 2000 毫秒反应时间窗），

被试都可以进行按键反应，按键后直接进入下一个试次。正式实验前，被试进行练习熟悉任务。练习所用字音和字形材料与正式实验不同。练习程序与正式实验程序相同，具体的实验流程如图 1 所示。

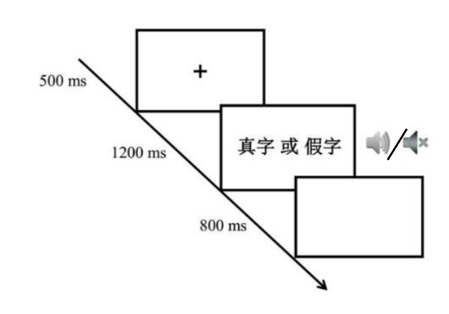


图 1　实验 1 流程图

2.2 数据分析

本研究使用 SPSS 20.0 对两组儿童的正确率和反应时进行 2（组别：DD、CA）×3（形音对应关系：形音一致、形音不一致、视觉单通道）重复测量方差分析。方差分析结果采用 Greenhouse-Geisser 法对结果进行校正，结果报告校正后的 p 值以及原始自由度。多重比较采用 Bonferroni 法进行校正。假字出现的试次作为填充试次，不纳入最后的数据分析。

2.3 结果

正确率和反应时的描述统计结果见表 2。

表 2 两组被试对字形判断的正确率和反应时[$M(SD)$]

统计指标	形音对应关系	DD	CA
正确率	形音一致	0.80(0.12)	0.86(0.09)
	形音不一致	0.77(0.13)	0.82(0.10)
	视觉单通道	0.76(0.13)	0.84(0.10)
反应时(ms)	形音一致	701(113)	640(93)
	形音不一致	726(108)	682(118)
	视觉单通道	714(91)	661(95)

在正确率上，形音对应关系的主效应显著[$F(2, 114) = 6.21, p = 0.003, \eta^2 = 0.10$]，形音一致条件下的正确率大于形音不一致和视觉单通道条件下的正确率($ps < 0.01$)，视觉单通道条件和形音不一致条件的正确率不存在显著差异($p > 0.05$)。组别的主效应显著[$F(1, 57) = 5.73, p = 0.02, \eta^2 = 0.09$]，CA 组的正确率大于 DD 组的正确率。形音对应关系和组别的交互作用不显著[$F(2, 114) = 0.48, p = 0.62$]。

在反应时上，形音对应关系的主效应显著[$F(2, 114) = 11.74, p < 0.001, \eta^2 = 0.17$]，形音一致条件和视觉单通道条件下的反应时快于形音不一致条件下的反应时($ps < 0.001$)，形音一致条件和视觉单通道条件下的反应时不存在显著差异($p > 0.05$)。组别的主效应显著[$F(2, 57) = 4.18, p = 0.046, \eta^2 = 0.07$]，CA 组的反应时短于 DD 组的反应时。形音对应关系和组别的交互作用不显著[$F(2, 114) = 0.76, p = 0.47$]。

综合正确率和反应时的方差分析结果，实验 1 发现 DD 组在视听跨通道的字形判断任务的表现差于 CA 组，但组别与形音对应关系的交互作用不显著，因此这一结果不能排除 DD 视觉单通道字形判断能力差的影响。为了排除个体视觉单通道加工的影响，参考 Evans(2020)的研究，本研究使用一致性获益分数(Congruency Benefit Score, CBS)作为衡量形-音整合能力的指标[CBS = （不一致条

件－一致条件）/不一致条件]。分别计算两组被试正确率和反应时的 CBS 值。正确率的 CBS 值越大，则代表形-音整合能力越差；反应时 CBS 值越大，则代表形-音整合能力越强。结果见表 3。为了使 CBS 值有意义，实验 1 首先分别将 DD 组和 CA 组正确率和反应时的 CBS 值与 0 进行单样本 t 检验，结果显示 CBS 值均与 0 存在显著差异($ps < 0.05$)。对两组被试正确率和反应时的 CBS 值进行独立样本 t 检验。结果显示 DD 组和 CA 组儿童正确率和反应时的 CBS 值均不存在显著的组间差异。

表 3 实验 1 两组被试正确率和反应时的 CBS 值[*M(SD)*]

	DD	CA	*t*	*Cohen' s d*
正确率	－0.06 (0.14)	－0.06 (0.11)	0.03	/
反应时	0.03 (0.08)	0.05 (0.07)	－1.12	/

实验 1 的结果表明一致的字音对儿童字形的判断能力有促进作用，并且 CA 组儿童在视觉字形判断任务上的表现好于 DD 组儿童。在排除视觉单通道的影响之后，字音对字形加工的影响在两组儿童间不存在差异。

3 实验 2：字形对发展性阅读障碍儿童语音判断的影响

3.1 *方法*

(1) 被试

与实验 1 相同，样本量估计结果显示实验 2 至少需要 54 名被试。64 名四到六年级汉语儿童参与了本实验，其中包括 DD 儿童 32 名（男 26 名，女 6 名），CA 组儿童 32 名（男 19 名，女 13 名）。卡方检验的结果显示两组儿童在各个年级人数的分布不存在显著差异($\chi^2 = 0, p = 1$)。所有儿童均为右利手，智力正常，不存在器质性损伤，视力或矫正视力正常。DD 儿童的入组标准同实验 1。本研究已通过相关单位的伦理审核，所有参与实验的儿童的监护人均签署了“知情同意书”。两组被试测验成绩的描述性统计结果见表 4。

表 4 实验 2 两组儿童的测验成绩[*M(SD)*]

测试项目	DD(*n*=32)	CA(*n*=32)	*t*	*Cohen' s d*
年龄（年）	11.02(0.90)	11.16(1.03)	－0.93	/
智商	110.06(12.73)	113.19(14.11)	－0.58	/
识字量（个）	2134(328)	2845(307)	-8.94^{***}	－2.24

注：*** 代表 $p < 0.001$。

(2) 实验材料

听觉刺激包括 30 个真实字音，45 个非真实字音(比如，biáo、zèn、ruān 等)。每个真实字音在形音一致、形音不一致、听觉单通道条件下各呈现 1 次。每个非真实字音在跨通道条件（真字和非真实字音同时出现）、听觉单通道条件下各呈现 1 次。最终真实字音、非真实字音各呈现 90 次。正式实验共包括 197 个试次（包括 17 个捕捉试次），真实字音和非真实字音出现的概率均等。字音刺激由一位普通话标准的女性主试使用 DELL 笔记本自带录音软件录制，采用 GoldWave 声音软件处理声音文件，声音刺激参数为取样率 44100Hz，采样为 16 位。视觉刺激材料为 105 个真字，均选自三年级至五年级语文课本。其中，30 个汉字与听觉刺激的真字发音一致、30 个汉字与听觉刺激的真字发音不一致、45 个伴随非真实字音出现。形音一致条件和形音不一致条件呈现的汉字在字频

（根据《笪骏现代汉语单字频率列表》）和笔画数匹配。所有真字都是左右结构，无重复。刺激出现在屏幕中央，字体为“黑体”，字的大小为 3cm×3cm。

(3) 实验设计

实验 2 为 3（形音对应关系：形音一致、形音不一致、听觉单通道）×2（组别：DD、CA）的混合实验设计。其中，形音对应关系为组内因素，包括语音与字形一致（以下简称“形音一致”）、语音与字形不一致(以下简称“形音不一致”)以及只听觉呈现语音，无视觉刺激呈现（以下简称“听觉单通道”）三个水平。组别为组间因素，包括 DD 组和 CA 组。

(4) 实验程序

实验由 E-prime 2.0 编制，具体的实验流程如图 2 所示。屏幕中央首先呈现 500 毫秒的黑色“+”注视点，注视点消失后耳机中出现 1200 毫秒的字音，字音出现的同时屏幕上出现与字音发音一致的真字（即形音一致条件，比如 hǎo-郝）、与字音发音不一致的真字（即形音不一致条件，如 xié-醋），或者真字不出现，只呈现字音（即听觉单通道）。视听跨通道刺激或听觉单通道刺激消失后，出现 800 毫秒的空白屏。要求被试判断耳机中出现的字音是否为真实的字音，“是”按“T”键、“否”按“Y”键。刺激一旦出现被试即可按键反应，一直到空白屏呈现结束（共计 2000 毫秒的反应时间窗），被试按键后则开始下一个试次。若被试未能在 2000 毫秒内做出反应，则自动进入下一个试次。为了保持儿童的目光聚集在屏幕中央区域，实验还包括无关任务“捕捉小黄人”。在该试次中，视觉刺激变为小黄人图片。要求被试看到小黄人按“B”键进行反应。共有 17 个小黄人刺激随机穿插其中。

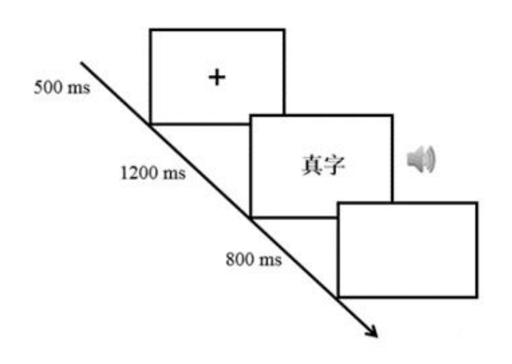


图 2 实验 2 流程图

3.2 统计方法

同实验 1，同样，非字音出现的试次以及小黄人出现的试次作为填充试次，不纳入最后的数据分析。

3.3 结果

正确率和反应时的描述统计结果见表 5。

表 5 两组被试对字音判断的正确率和反应时[M(SD)]

统计指标	形音对应关系	DD	CA
正确率	形音一致	0.83(0.12)	0.88(0.09)
	形音不一致	0.67(0.16)	0.73(0.11)
	听觉单通道	0.72(0.12)	0.82(0.10)
反应时(ms)	形音一致	884(110)	823(123)
	形音不一致	972(152)	963(130)

	听觉单通道	1007(148)	955(147)

在正确率上，形音对应关系的主效应显著[$F(2, 124) = 53.11$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.46$]，形音一致条件下的正确率大于听觉单通道条件下的正确率，听觉单通道条件下的正确率大于形音不一致条件下的正确率(ps < 0.05)。组别的主效应显著[$F(1, 62) = 7.92$, $p = 0.01$, $\eta^2 = 0.11$]，DD 组的正确率小于 CA 组。形音对应关系和组别的交互作用不显著[$F(2, 124) = 0.9$, $p = 0.40$]。

在反应时上，形音对应关系的主效应显著[$F(2, 124) = 94.08$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.60$]，形音一致条件下的反应时快于形音不一致条件下的反应时($p < 0.001$)，不一致条件和听觉单通道条件下的反应时不存在显著差异($p > 0.1$)。组别的主效应不显著[$F(1, 62) = 1.66$, $p = 0.20$]。形音对应关系和组别的交互作用显著[$F(2, 124) = 3.73$, $p = 0.03$, $\eta^2 = 0.06$]。进一步的简单效应分析表明，在形音一致条件下，DD 组的反应时显著长于 CA 组($p = 0.04$)。在形音不一致和听觉单通道条件下，两组儿童的反应时不存在显著的差异($p > 0.1$)。在 DD 组，形音一致条件的反应时快于形音不一致条件和听觉单通道条件的反应时，形音不一致条件快于单通道条件反应时(ps < 0.05)；在 CA 组，形音一致条件的反应时快于形音不一致条件和听觉单通道条件的反应时(ps < 0.001)，形音不一致条件和单通道条件的反应时不存在显著差异($p > 0.1$)。

综合正确率和反应时的方差分析结果，实验 2 发现 DD 组在视听跨通道的语音判断任务的表现差于 CA 组。为了排除个体听觉单通道加工的影响，与实验 1 相同，分别计算两组被试正确率和反应时的 CBS 值，结果见表 6。为了使 CBS 值有意义，实验 2 首先分别将 DD 组和 CA 组正确率和反应时的 CBS 值与 0 进行单样本 t 检验，结果显示 CBS 值均与 0 存在显著差异(ps < 0.05)。对两组被试正确率和反应时的 CBS 值进行独立样本 t 检验。结果显示反应时的 CBS 值存在显著差异，CA 组显著大于 DD 组($t = -2.55$, $p = 0.01$, 95% CI [−0.11, −0.01])。

表 6 实验 2 两组被试正确率和反应时的 CBS[M(SD)]

统计指标	DD	CA	t	Cohen’s d
正确率	−0.34 (0.58)	−0.24 (0.22)	−0.89	/
反应时	0.08 (0.09)	0.14 (0.10)	−2.55*	−0.63

注：* 代表 $p < 0.05$。

实验 2 的结果表明一致的字形对儿童字音判断能力有促进作用，不一致的字形对儿童字音判断能力有抑制作用，并且 CA 组儿童在视觉字形判断任务上的表现好于 DD 组儿童。在排除听觉单通道的影响之后，字形对字音加工的影响表现出组间差异，DD 组表现出更差的字形对字音加工的影响作用。

4 讨论

本研究设计了 2 个实验，分别探讨汉语 DD 儿童在形-音整合过程中，字形与字音相互影响是否存在异常。结果显示，DD 儿童在语音对字形判断的影响以及字形对语音判断的影响这两种任务下的表现均差于 CA 组儿童。在使用 CBS 值排除了单感觉通道加工的干扰后，DD 儿童在字形对语音加工影响的任务下表现得更差。以上结果说明 DD 儿童在形-音整合的过程中，仅在字形对语音加工的影响中表现出异常。

实验 1 和实验 2 分别使用跨通道的字形和语音判断任务，综合正确率和反应时的结果发现，一致语音对字形加工的促进作用在两组儿童中均达到显著水平，但不一致的语音对字形加工的抑制作用不显著；一致字形和不一致字形对语音加

工的促进和抑制作用均显著。在形-音整合过程中，一致条件和不一致条件涉及了不同的认知加工机制。个体对一致刺激的加工是自动化的过程，而对不一致刺激的加工是有意识的注意控制的过程(Posner et al., 2004)。实验 1 和实验 2 均发现形音一致条件存在显著的促进作用，说明在形-音整合过程中，字形和语音的相互影响在形音一致条件下均是自动化加工。然而，仅实验 2 发现不一致字形对语音加工的抑制作用，实验 1 不一致语音对字形加工的抑制作用不显著。这可能是因为个体更加容易抑制不一致的听觉刺激对视觉刺激加工的影响，但难以抑制视觉对听觉刺激加工的影响。已有研究指出个体对视觉和听觉刺激的加工存在视觉主导效应，即面对视听刺激对，更容易加工视觉刺激(Colavita, 1974)。本研究推测，由于视觉对听觉刺激的干扰作用会更加显著，在实验 2 中，当要求被试对语音进行判断时，同时呈现的不一致字形会产生较大的干扰作用，被试难以抑制不一致字形对语音加工的干扰。

通过对 CBS 值进行组间比较，本研究发现 DD 儿童表现出字形对语音加工影响的异常，但语音对字形加工的影响不存在异常。这一结果与已有研究结果不一致(Clayton & Hulme, 2018; Nash et al., 2016; Yang et al., 2020)。Yang 等人(2020)使用与实验 1 相同的实验范式，结果发现 DD 儿童在左侧角回，左侧颞上回以及左侧额上回、额中回的激活异常。这说明在神经层面，DD 儿童语音对字形加工的影响存在异常。本研究推测不一致的结果可能是因为 DD 语音对字形加工影响的异常在行为上的表现并不是很明显，只有使用比较敏感的神经影像技术才能测查出来。与本研究一致的是，Yang 等人(2020)的研究在行为层面同样没有发现 DD 儿童和 CA 儿童在这项任务下存在显著的组间差异。此外，本研究发现 DD 儿童字形对语音加工的影响存在异常，这与 Nash 等人(2016)和 Clayton 与 Hulme(2018)的研究结果不一致。他们采用与实验 2 类似的实验范式，但字形早于语音呈现 500 毫秒，结果发现 DD 组儿童字形对语音加工的影响不存在异常。结果不一致的原因可能与实验范式中字形和语音的时间间隔不同有关。有研究表明 DD 具有更大的视听时间整合窗口，即当视听刺激的时间间隔较大时，DD 的视听整合能力比正常儿童更好(Francisco et al., 2017; Hairston et al., 2005)。但是，当语音和字形同时呈现时，DD 的视听整合能力的优势消失。因此，在实验 2 中，当形音刺激同时呈现时，DD 儿童字形对语音加工的影响表现出异常。

另一方面，DD 仅在字形对语音加工的影响上存在异常，但语音对字形加工的影响不存在异常。出现这一结果的原因可能有三种。第一，实验 1 中字音对字形加工的影响，可能涉及到字音到字形的转换；实验 2 中字形对字音加工的影响涉及到字形到字音的转换。Snowling(1980)的研究也发现 DD 儿童仅在字形到字音的转换任务中表现出异常，但在字音到字形的转换任务中不存在异常。他认为这可能是因为字形到字音的转换任务对于儿童来说是比较难的任务，因此没有表现出差异。在本研究中，仅在字形对语音加工的影响存在异常（实验 2），但语音对字形加工的影响不存在异常（实验 1），这也可能是因为实验 1 中涉及到的字音到字形的转换较难，两组儿童组间差异不明显。第二，有研究指出字形到字音的转换主要与个体的阅读能力有关，而字音到字形的转换与个体的听写能力有关(Wimmer & Mayringer, 2002)。本研究的被试群体为阅读存在障碍的儿童，因此更有可能表现出与形到音转换更相关的，字形对语音加工影响存在异常，而语音对字形加工的影响则不存在异常。但本研究并没有进一步测量DD儿童的听写能力，因此需要今后的研究在测量了 DD 听写相关技能后得出更为准确的结论。第三，本研究的结果也可能与汉语的语言特异性有关。不同于拼音文字，汉字不存在明

确的形-音对应规则。汉语约有 1200 个基本音节（卢偓, 2001），但常用字却多达 3500 个。这使得在汉语阅读过程中，形到音的对应往往是一对一的（多音字除外）（如，“熟”对应“sh ú”），但音到形的对应则更可能存在一个音对多个汉字的情况（如，“sh ú”则可对应“熟、塾、赎”等字），从而造成读者在阅读过程中字形对语音的约束更大（字对应明确的音），但字音对字形的约束则较小（字音很大程度上难以对应具体的字形）。因此，字形对语音的加工的影响对汉语读者来说有更加重要的作用。并且，已有的众多研究也发现视觉加工对汉语阅读存在关键作用，汉语 DD 更容易表现出视觉字形加工缺陷(Chung et al., 2008; Meng et al., 2011; Qian & Bi, 2014)。本研究的结果也显示汉语 DD 儿童视觉单通道的字形判断任务比听觉单通道的字音判断任务表现出更明显的加工缺陷。本研究发现汉语 DD 儿童仅在字形对语音加工的影响上存在异常，可能是因为 DD 字形加工存在异常，从而导致其对语音加工的影响减弱。

本研究的结果存在一定的理论和实践意义。在已有研究结论的基础上，本研究的结果创新性地揭示了在形-音整合的过程中，汉语 DD 儿童表现出字形对语音加工影响的异常，但语音对字形加工的影响不存在异常。从理论意义上来讲，本研究的结果进一步对汉语 DD 的形-音整合缺陷的内在机制进行了阐释，即 DD 字形加工能力较差，进而字形对语音加工影响存在异常，导致阅读困难。从实践意义上讲，本研究的结果为今后 DD 阅读能力的矫治提供了理论基础，即可以通过训练 DD 字形识别和其利用字形加工语音的能力，进而提高其阅读能力。

本研究也存在一定的局限性。第一，本研究以汉语 DD 儿童为被试，并设置了同年龄对照组，但没有招募同阅读水平的正常儿童作为对照组。这就导致在形-音整合过程中，DD 儿童字形对语音加工的影响存在困难这一现象可能是源于其缺乏足够的阅读经验，而不是 DD 儿童固有的缺陷。将来的研究需要进一步与同阅读水平对照组进行比较，以明确 DD 字形对语音加工的影响的困难是否是其固有缺陷。第二，本研究没有考虑时间间隔的可能影响。已有研究发现当视听刺激的时间间隔变大时，DD 仍然具有一定的视听整合能力，正常读者的视听整合能力则消失(Francisco et al., 2017; Hairston et al., 2005)。那么，如果形音刺激有一定时间间隔时，其字形和语音的相互影响又会有怎样的表现呢？后续需要更系统地操作这些影响因素，全面探查 DD 在形-音整合过程中字形和语音的相互影响。

5 结论

综合以上结果，本研究主要得出如下结论：汉语 DD 儿童形-音整合缺陷主要来源于更差的视觉加工技能，具体表现为 DD 儿童字形对语音加工的影响与正常儿童相比更弱，但语音对字形加工的影响与 CA 组不存在差异。

参考文献

Beech, J. R. (2002). Individual differences in mature readers in reading, spelling, and grapheme-phoneme conversion. *Current Psychology, 21*(2), 121−132.

Blau, V., van Atteveldt, N., Ekkebus, M., Goebel, R., & Blomert, L. (2009). Reduced neural integration of letters and speech sounds links phonological and reading deficits in adult dyslexia. *Current Biology, 19*(6), 503−508.

Blau, V., Reithler, J., van Atteveldt N, Seitz, J., Gerretsen, P., Goebel, R., & Blomert, L. (2010). Deviant processing of letters and speech sounds as proximate cause of reading failure: A functional magnetic resonance imaging study of dyslexic children. *Brain, 133*(3), 868−879.

Blomert, L. (2011). The neural signature of orthographic−phonological binding in successful and failing reading development. *Neuroimage, 57*(3), 695−703.

Caffarra, S., Lizarazu, M., Molinaro, N., & Carreiras, M. (2021). Reading-related brain changes in audiovisual processing: cross-sectional and longitudinal MEG evidence. *Journal of Neuroscience, 41*(27), 5867−5875.

Chung, K. K. H., McBride-Chang, C., Wong, S. W. L., Cheung, H., Penney, T. B., & Ho, C. S. H. (2008). The role of visual and auditory temporal processing for Chinese children with developmental dyslexia. *Annals of Dyslexia, 58*, 15−35.

Clayton, F. J., & Hulme, C. (2018). Automatic activation of sounds by letters occurs early in development but is not impaired in children with dyslexia. *Scientific Studies of Reading, 22*(2), 137−151.

Colavita, F. B. (1974). Human sensory dominance. *Perception & Psychophysics, 16* (2), 409-412.

Evens, K. K. (2020). The role of selective attention in cross-modal interactions between auditory and visual features. *Cognition, 196*, Article 104119. https://doi.org/10.1016/j.cognition.2019.104119

Faul, F., Erdfelder, E., Lang, A. G., & Buchner, A. (2007). G*power 3: A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behavior Research Methods, 39*(2), 175−191.

Francisco, A. A., Jesse, A., Groen, M. A., & McQueen, J. M. (2017). A general audiovisual temporal processing deficit in adult readers with dyslexia. *Journal of Speech Language and Hearing Research, 60*(1), 144−158.

Froyen, D., Bonte, M. L., van Atteveldt, N., & Blomert, L. (2008). The long road to automation: neurocognitive development of letter-speech sound processing. *Journal of Cognitive Neuroscience, 21*(3), 567-580.

Froyen, D., van Atteveldt, N., & Blomert, L. (2010). Exploring the role of low level visual processing in letter-speech sound integration: a visual MMN study. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, *4*, Article 9. https://doi.org/10.3389/fnint.2010.00009

Froyen, D., Willems, G., & Blomert, L. (2011). Evidence for a specific cross-modal association deficit in dyslexia: an electrophysiological study of letter−speech sound processing. *Developmetal Science, 14*(4), 635−648.

Hahn, N., Foxe, J. J., & Molholm, S. (2014). Impairments of multisensory integration and cross-sensory learning as pathway to dyslexia. *Neuroscience Biobehaveral Reviews, 47*, 384−392.

Hairston, W. D., Burdette, J. H., Flowers, D. L., Wood, F. B., & Wallace, M. T. (2005). Altered temporal profile of visual-auditory multisensory interactions in dyslexia. *Experimental Brain Research, 166*, 474−480.

Kast, M., Bezzola, L., Jancke, L., & Meyer, M. (2011). Multi- and unisensory decoding of words and nonwords result in differential brain responses in dyslexic and nondyslexic adults. *Brain and Language, 119*(3), 136−148.

Koelewijn, T., Bronkhorst, A.W., & Theeuwes J. (2010). Attention and the multiple stages of multisensory integration: a review of audiovisual studies. *Acta Psychologica, 134*(3), 372−384.

Kronschnabel, J., Brem, S., Maurer, U., & Brandies, D. (2014). The level of audiovisual print−speech integration deficits in dyslexia. *Neuropsychologia, 62*, 245−261.

Law, J.M., Devos, A., Vanderauwera, J., Wouters, J., Ghesquiere, P., & Vandermosten, M. (2018). Grapheme-phoneme learning in an unknown Orthography: a study in typical reading and dyslexic children. *Frontiers in Psychology, 9*, Article 1393. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.01393

Li, D., Hu, K. D., Chen, J. P., Jin, Y., & Li, M. (1988). Report of Combined Raven Test (CRT) in Shanghai urban area. *Journal of Psychological Science, 4*(7), 29−33.

[李丹, 胡克定, 陈国鹏, 金瑜, 李眉. (1988). 瑞文测验联合型(CRT)上海市区试测报告. *心理科学通讯*, *4(7)*, 29−33.]

Lu, W. (2001). The disagreement on number (quantity) and composition distribution of modern Chinese syllables. *Language Teaching and Linguistic Studies, (6),* 28−34.

[卢偓. (2001). 现代汉语音节的数量与构成分布. 语言教学与研究. *(6)*, 28−34.]

Lyon, G. R., Shaywitz, S. E., & Shaywitz, B. A. (2003). A definition of dyslexia. *Annals of Dyslexia*, *53*(1), 1−14.
Macoir, J., Fossard, M., Saint-Pierre, M., & Auclair-Ouellet, N. (2012). Phonological or procedural dyslexia: specific deficit of complex grapheme-to-phoneme conversion. *Journal of Neurolinguistics, 25(3)*, 163−177.
Mittag, M., Thesleff, P., Laasonen, M., & Kujala, T. (2013). The neurophysiological basis of the integration of written and heard syllables in dyslexic adults. *Clinical Neurophysiology, 124*(2), 315−326.
Nash, H. M., Gooch, D., Hulme, C., Mahajan, Y., McArthur, G., Steinmetzger, K., & Snowling, M. J. (2016). Are the literacy difficulties that characterize developmental dyslexia associated with a failure to integrate letters and speech sounds? *Developmental Science, 20*, Article e12423. https://doi.org/10.1111/desc.12423
Qian, Y., & Bi, H. Y. (2014). The visual magnocellular deficit in Chinese-speaking children with developmental dyslexia. *Frontiers in Psychology, 5,* Article 692. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00692
Shaywitz, S. M. D. (2019). Overcoming dyslexia. (Liu et al., Trans.). Random House Inc. (Original work publish 2003).
[萨利·施维茨. (2019). 聪明的笨小孩. (刘丽等 译). 北京: 北京师范大学出版社.]
Wang, X. L., & Tao, B. P. (1996). Chinese character recognition test battery and assessment scale for primary school children. Shanghai, China: Shanghai Education Press.
[王孝玲, 陶保平. (1993). *小学生识字量测试题库及评价量表*. 上海: 上海教育出版社.]
Wimmer, H., & Mayringer, H. (2002). Dysfluent reading in the absence of spelling difficulties: a specific disability in regular orthographies. *Journal of Educational Psychology, 94*(2), 272−277.
Yang, Y., Yang, Y. H., Li, J.J., & Bi, H.Y. (2020). An audiovisual integration deficit underlies reading failure in nontransparent writing systems: an fMRI study of Chinese children with dyslexia. *Journal of Neurolinguistics, 54*, Article 1000884. https://doi.org/10.1016/j.jneuroling.2019.100884

(通讯作者：毕鸿燕 E-mail：bihy@psych.ac.cn)

作者贡献声明：

刘梦连：负责数据分析及文章的撰写；
杨滢晖：提出研究思路和进行实验；
赵一帆：论文最终版本修订；
毕鸿燕：研究命题的设计和方法。